

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20240242

盾构切削既有车站障碍桩体掘进参数优化 数值模拟

贾蓬¹, 孙彬煜¹, 朱利², 宋立民²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中铁三局集团 第四工程有限公司, 北京 102300)

摘要: 盾构机在下穿既有车站遭遇障碍桩体时,往往需要直接切削桩体通过,切桩时盾构机的掘进参数控制对于既有上部结构的安全性和稳定性至关重要. 针对沈阳地铁下穿既有车站切桩施工工程,采用ABAQUS有限元数值模拟软件,模拟刀盘动态切削障碍桩体过程. 结果表明,切桩过程中无论盾构机是驶向车站还是驶离车站,场切深指数和掘进比能均随推速的增加而增大;桩体钢筋被切断的长度随推速和转速的增加而增大,当推速小于0.35 mm/s时,切断长度小于350 mm的钢筋数量较多;刀盘转速超过0.140 rad/s后,长钢筋的数量明显增多;随着推速的增加,切桩时对周围桩体的扰动度也随之增加,在推速超过0.4 mm/s后应力扰动度显著增加.

关键词: 盾构穿越;动态切桩;钢筋切断;掘进比能;应力扰动度

中图分类号: TU 94 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)11-0115-10

Numerical Simulation on Tunneling Parameter Optimization of Shield Machine in Cutting Obstacle Piles in Existing Stations

JIA Peng¹, SUN Bin-yu¹, ZHU Li², SONG Li-min²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. The Fourth Engineering Co., Ltd., China Railway Third Bureau Group, Beijing 102300, China. Corresponding author: JIA Peng, E-mail: polarjia@163.com)

Abstract: When the shield machine encounters obstacle piles while tunneling beneath an existing station, it often needs to directly cut through the piles. During this process, the control of the shield machine's tunneling parameters is crucial for ensuring the safety and stability of the existing upper structure. For the pile-cutting construction of the Shenyang Metro passing beneath existing stations, ABAQUS finite element numerical simulation software was used to simulate the dynamic cutting process of the cutterhead through the obstacle piles. The results show that during the pile-cutting process, whether the shield machine is advancing towards or away from the station, both the field penetration index (FPI) and the tunneling specific energy increase with the advancing speed. The length of the rebar cut during the pile-cutting process also increases with the advancing speed and cutterhead rotation speed. When the advancing speed is less than 0.35 mm/s, the number of rebars with lengths shorter than 350 mm is relatively high. However, when the cutterhead rotation speed exceeds 0.140 rad/s, the number of long rebars increases significantly. As the advancing speed increases, the disturbance degree to the surrounding piles also increases, and the disturbance degree notably increases when the advancing speed exceeds 0.4 mm/s.

Key words: shield tunneling; dynamic pile-cutting; rebar cutting; tunneling specific energy; stress disturbance degree

收稿日期: 2024-12-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N25DCG007).

作者简介: 贾蓬(1973—),女,内蒙古呼和浩特人,东北大学教授,博士生导师.

随着城市地铁交通的快速发展,地铁隧道建设不可避免地需要穿越既有建筑物的桩基础^[1-4].传统的除桩方法,如人工挖孔除桩、桩基托换等,往往存在对周边环境影响大、施工成本高、周期长^[5-6]以及施工困难等问题.因此,采用盾构机施工时,利用盾构机直接切削桩体^[7-9]可以克服传统除桩方法的弊端.然而,尽管盾构切桩技术具有诸多优势,但由于盾构切桩过程中的掘进参数不仅影响盾构切桩的掘进效果,还直接关系到上部既有结构的安全性^[10],盾构切桩在实际施工中仍面临诸多挑战.

自 2009 年以来,国内外学者针对盾构切桩过程的掘进参数优化开展了大量研究^[11-12].在现场试验方面,Shi 等^[13]通过分析盾构切削地下连续墙现场施工过程中的掘进数据,提出了切削过程中建议的掘进参数及钢筋损伤模式.

在理论分析方面,Deng 等^[14]、Wang 等^[15]和 Xu 等^[16]从理论角度研究了盾构直接切削桩基过程中的掘进参数特性,揭示了其变化规律,并结

合实际切桩工程对掘进参数进行了优化;Chen 等^[17]通过理论分析结合数值模拟切桩工程,分析了不同参数和阶段下桩基的变形与承载力变化;Zhang 等^[18]通过建立三维模型与现场监测数据对比,分析了双隧道盾构施工扰动下附近的桩群变形机制.

在数值模拟方面,Jin 等^[19]采用数值模型模拟刀具切削钢筋的过程,并针对钢筋切断效果,优化了盾构刀盘刀具设计;Yu 等^[20]通过数值模拟和室内试验验证,提出了盾构切削钢筋混凝土结构的建议推速和扭矩范围;Liu 等^[21]通过数值模拟盾构切削桥桩与现场监测数据对比,探讨了不同推进参数对桩底位移及扭矩的影响;Fang 等^[22]、Deng 等^[23]和 Liu 等^[24]采用数值仿真分析了切桩过程中桩基承载力变化和钢筋断裂情况.

盾构切桩的掘进参数选择与土层参数、盾构机刀盘型式等因素密切相关,因此不同工程提出的优化参数不尽相同.本文统计了 2010—2024 年国内外切桩工程的盾构机掘进参数,如表 1 所示.

表 1 盾构切桩工程掘进参数统计表

Table 1 Statistical table of tunneling parameters for pile-cutting engineering by shield machine

工程名	土层参数	刀盘转速	推速
		rad·s ⁻¹	mm·s ⁻¹
宁波轨道交通 4 号线柳宁盾构区间工程 ^[25]	淤泥质土、粉砂粉质黏土	贴近桩时控制在 0.084	桩前 1 m 时 0.083~0.167
杭州地铁 2 号线下穿凤起桥 ^[26]	粉夹砂质粉土、砂质粉土、淤泥质粉质黏土	0.125~0.157	接近桩基时 0.500~0.830, 桩前 0.017~0.033
苏州 2 号线石路站下穿广济桥 ^[27]	粉砂、粉质黏土	0.052~0.105	0.017~0.050
大连地铁一期工程华北路至山东路盾构穿越桥梁 ^[28]	淤泥质粉细砂层、淤泥质土层和粉细砂层	0.084	0.167~0.250
上海地铁 10 号线盾构切削简支梁桥桩基 ^[29]	黏质粉土夹粉质黏土、灰色砂质粉土、淤泥质黏土	0.067	0.083
广州地铁 4 号线南延段广大区间盾构机下穿大涌桥 ^[30]	洪积粉细砂层、粉质黏土层	0.084	0.167~0.250
北京地铁下穿桥梁桩基 ^[21]	粉质黏土-中细沙-卵石地层,大多为卵石	0.063	0.083~0.167
哈尔滨地铁 3 号线盾构切割桥桩 ^[31]	主要地层为中砂层	—	0.167~0.333
沈阳地铁 1 号线东延线下穿桥桩	主要地层为圆砾、砾砂层	0.084~0.105	0.083~0.250
沈阳地铁 4 号线下穿 2 号线车站 ^[32]	切桩段为砾砂层	—	0.250~0.420
广州地铁 12 号线官洲站—大学城北站 ^[33]	全风化混合花岗岩、强风化混合花岗岩和中风化混合花岗岩,局部穿越砂质黏土	切桩过程中 0.084~0.105	桩前 3 m 时控制在 0.083~0.167;切桩过程中控制在 0.083 内
南昌地铁 2 号线盾构穿越桥梁桩 ^[34]	素填土、粉黏土、砾砂、圆砾、强风化泥质粉砂岩和中风化泥质粉砂岩	0.031~0.052	0.017~0.083
深圳地铁 10 号线穿越公路桥梁桩群 ^[35]	中微风化花岗岩层和砾质黏性土层	0.125~0.147	0.167~0.333
沈阳地铁 6 号线下穿 2 号线市图书馆站 ^[36]	切桩段为砂层	0.115	0.333~0.833

从表1可以看出,在淤泥与粉质细砂等软土地层中盾构切桩施工时,推速一般控制在0.25 mm/s以下,转速控制在0.084~0.157 rad/s;在砂层与卵石地层中,切桩推速维持在0.08~0.83 mm/s,转速为0.052~0.105 rad/s;在风化岩层中,切桩推速控制在0.02~0.33 mm/s,转速控制在0.031~0.147 rad/s.

已有的理论研究和现场数据为盾构切削障碍桩施工提供了重要的理论和实践参考.针对具体工程的切桩优化参数需要结合工程实际条件加以确定.此外,由于现场切割的桩体多为钢筋混凝土桩,若桩内钢筋切割过长或未切断,会缠绕刀盘从而显著降低盾构机的施工效率.目前已有研究多将既有桩体简化为素桩,关于盾构机掘进参数与桩内钢筋切割效果关系的研究亟待深入.另外,盾构机切割障碍桩体时会对周边桩体产生扰动,若扰动过大则会导致桩体变形进而影响其承载效果.而在数值模拟研究时,往往采用生死单元法来模拟掘进和切削过程,未考虑动态切桩对周围桩体的扰动效应,因而难以在掘进参数优化过程中兼顾既有承载桩体的扰动程度.基于此,本文针对沈阳地铁6号线下穿中街站的切桩施工工程,采用ABAQUS有限元数值模拟软件分析掘进参数与切桩效率、钢筋切断效果及应力扰动度的关系,提出盾构切桩的优化掘进参数建议,为工程选择适宜的切桩掘进参数提供

参考.

1 动态切桩数值模型的建立

1.1 桩-土体数值模型建立

沈阳地铁6号线一期工程中街站—大南门站区间下穿地铁1号线中街站,该站为单柱双跨暗挖双层车站,导洞围护桩采用 $\phi 800@1200$ 的钻孔灌注桩,桩身主筋直径25 mm.中街站—大南门站区间为双线盾构区间,区间结构距离既有车站底板3 m,需磨除冲突围护桩共计22根,盾构机需一次同时切桩5~6根.盾构机与桩体位置关系见图1,切桩工程场地平面图见图2a,冲突桩切削长度为2.2~3.8 m/根.盾构穿越桩基地层主要为圆砾和砾砂层,切桩段地质纵剖面图见图2b.区间切桩地段的主要土体及力学性质如表2所示.

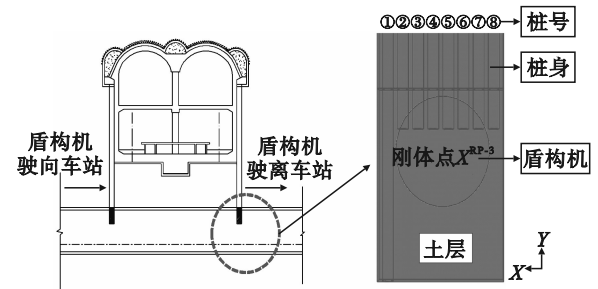


图1 桩-土及盾构机刀盘相对位置关系图
Fig. 1 Diagram of relative positioning between pile-soil and shield machine cutter head

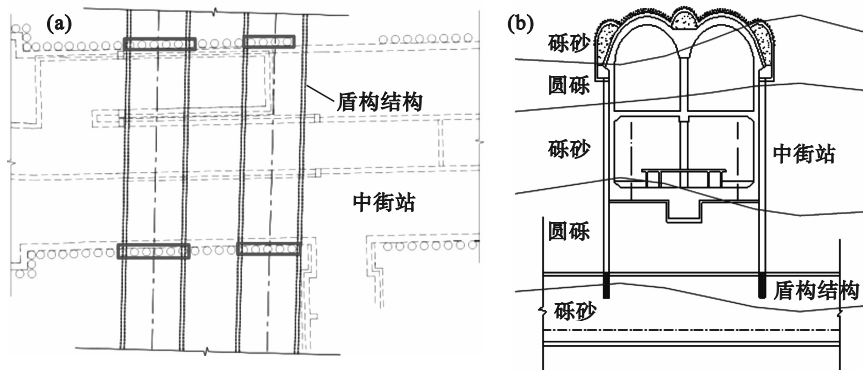


图2 盾构切桩概况

Fig. 2 Overview of pile cutting by shield machine
(a)一场地平面图; (b)一地质纵剖面图.

表2 主要土体及其力学性质

Table 2 Main soil types and their mechanical properties

岩土	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比	孔隙率/%	静止侧压力系数	泊松比	变形模量/MPa
粉细砂	1.90	0.85	46.0	0.47	0.32	10
中粗砂	2.00	0.80	44.0	0.43	0.30	20
砾砂	2.00	0.75	43.0	0.41	0.29	28
圆砾	2.05	0.65	39.0	0.35	0.26	35

根据桩基与土体参数建立刀盘和桩-土体模型如图 1 所示. 在桩-土数值模拟模型中, 土体部分采用摩尔-库伦本构模型, 以较好地模拟土体的力学特性. 为了更准确地反映切桩过程中混凝土的损伤, 混凝土桩基选择了 JH-2 本构模型^[16], 具体模型参数见表 3. 桩和钢筋之间设置了嵌套

接触, 并分别在桩顶和土体的上表面施加固定约束, 其他边界则采用法向约束, 以确保边界条件符合实际工程情况. 同时, 桩基与土体之间设置摩擦接触, 以模拟桩侧摩阻力的作用, 从而反映桩基在施工中的受力情况.

表 3 混凝土模型参数
Table 3 Concrete model parameters

密度 kg·m ⁻³	剪切模量 G/MPa	完整材料强度 参数 A	损伤材料强度 参数 B	完整材料强度 参数 N	应变率系数 C	损伤材料强度 参数 M	抗拉强度 T/MPa
2 400	12 500	0. 630 4	0. 210 1	0. 843 7	0. 006	0. 843 7	3. 4

1.2 盾构机刀盘模型的建立

本项目拟采用盾构机开挖直径 6 470 mm, 刀盘结构型式为辐条加辐板复合式, 刀盘主要构件材质为 Q345 钢, 刀盘开口率为 45%, 盾构机刀盘配置 27 把单刃面滚刀, 8 把单刃边滚刀、24 把正面刮刀及 16 把边刮刀. 盾构机刀盘尺寸型式见图 3. 为适应盾构切桩工程, 将盾构机面滚刀替换为贝壳刀进行切桩施工, 其他刀盘尺寸相关参数均与实际相符. 刀盘模型如图 4 所示.

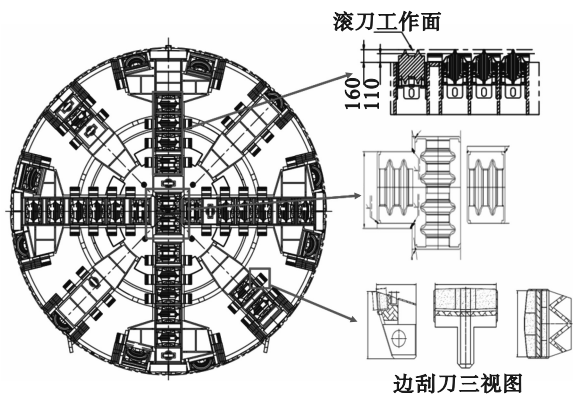


图 3 盾构机刀盘型式(单位: mm)

Fig. 3 Cutter head types of shield machine(unit: mm)

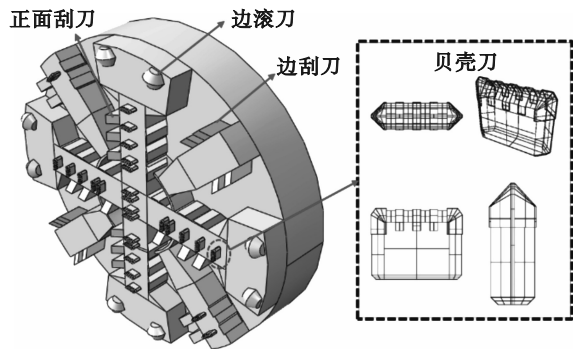


图 4 盾构机刀盘模型

Fig. 4 Cutter head model of shield machine

模型中将刀盘设置为刚体, 刀盘与土体、刀盘与桩基之间均为摩擦接触, 以模拟实际施工中

的相互作用. 对刀盘施加前进速度以模拟盾构机的推速; 对刀盘施加旋转速度, 以模拟盾构机的刀盘转速. 在刀盘的前进和旋转切割作用下, 土体和桩基单元在达到设定的损伤阈值后被删除, 从而模拟实际施工过程中对土体和桩基的切削. 数值模拟工况分为两类: 盾构机驶向车站和盾构机驶离车站, 如图 1 所示. 结合国内已完成的类似切桩工程案例, 本文选取的刀盘推速为 0.25~0.50 mm/s; 刀盘转速为 0.125~0.150 rad/s.

1.3 切桩过程数值模拟实现

采用 ABAQUS 中的单元删除算法, 利用包含单元删除功能的损伤演化模型, 模拟刀盘切桩过程. 为更好地观察桩基被切断的过程, 在 ABAQUS 的后处理模块中, 将土体单元隐藏, 仅保留桩基和刀盘. 模拟初始步设置为盾构机刀盘刚好与桩基接触, 图 5 给出了桩被盾构机切削过程中桩身的应力变化.

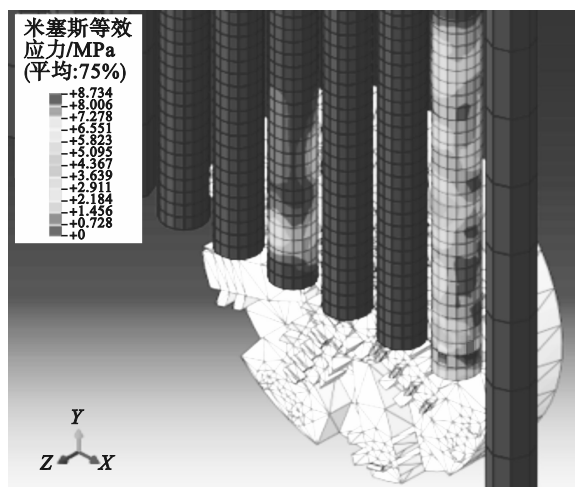


图 5 刀盘开始切桩

Fig. 5 Pile cutting performed by cutterhead

桩身与刀盘接触部位随着刀盘旋转推进, 应力不断增大, 当桩单元应力达到损伤值时, 单元

被删除;同一位置桩单元全部删除时则桩体被切断,如图 6 所示.

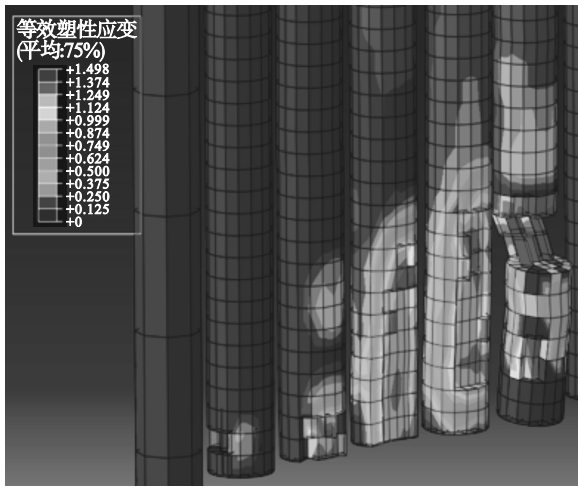


图 6 桩体等效塑性应变云图

Fig. 6 Equivalent plastic strain contour map of pile body

为验证模型的可靠性,采用本模型对与本工程施工场地条件相似的沈阳地铁 1 号线东延线盾构切削桥桩工程进行模拟,得到的切桩过程中盾构机刀盘扭矩与实测数据对比如图 7 所示.数值模拟刀盘扭矩与实测数据的变化规律一致,最大误差为 4%,验证了本模型的可靠性.

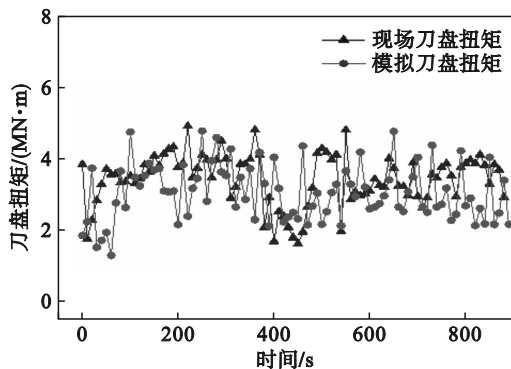


图 7 刀盘扭矩数值计算结果与与现场实测结果对比
Fig. 7 Comparison of calculated cutterhead torque values with on-site measured results

2 数值模拟结果分析

2.1 基于切桩效率的掘进参数优化

切桩效率是掘进参数优化的重要目标之一,因此,可以利用反映切桩效率的参数作为衡量盾构机掘进参数(推速和转速)是否合理的依据.在此引入场切深指数(field penetration index, FPI)与盾构机掘进比能^[37]来评价盾构机切桩效率.

FPI 用来评价材料抵抗刀具切入的能力.

$$FPI = \frac{F}{P}, \quad (1)$$

$$P = \frac{v}{\omega}. \quad (2)$$

其中: F 代表刀盘主推进力(MN); P 为刀具的单圈切深,即刀盘的贯入度(mm/r); v 是盾构机的推速(mm/s); ω 为刀盘转速(rad/s).

盾构的掘进比能 E 评价了盾构掘进单位体积岩土体所消耗的能量,定义为

$$E = \frac{2\pi\omega T + Fv}{0.25\pi D^2 v} = \frac{2\pi T + FP}{0.25\pi D^2 P}. \quad (3)$$

式中: E 为掘进比能(MJ/m³); T 为刀盘扭矩(MN·m); D 为刀盘直径(m).

固定转速为 0.125 rad/s 不变,不同推速情况下,驶向车站和驶离车站切桩时的 FPI 和掘进比能均值见图 8 和图 9.

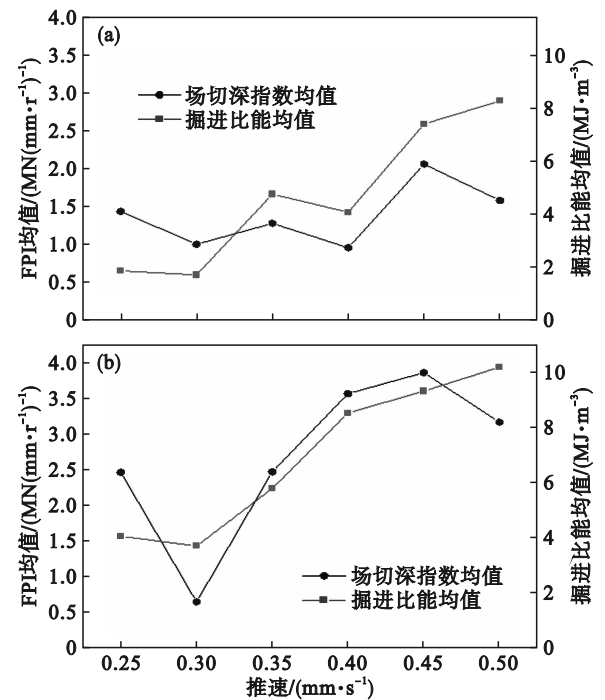
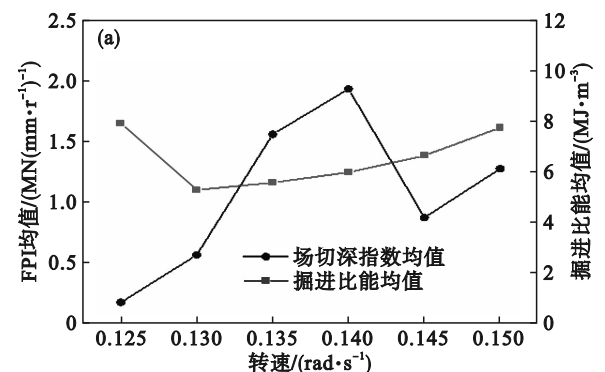


图 8 推速对 FPI 与掘进比能均值的影响

Fig. 8 Effect of advancing speed on average values of FPI and tunneling specific energy

(a)—驶向车站;(b)—驶离车站.



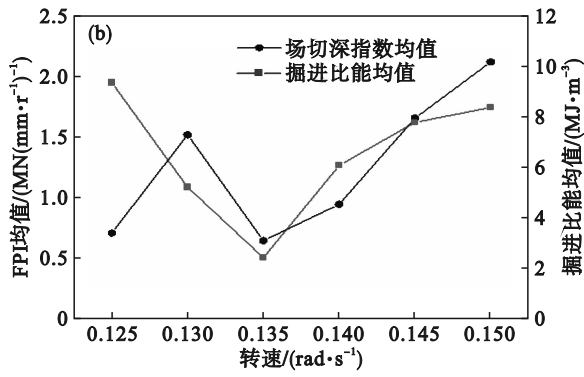


图9 转速对FPI与掘进比能均值的影响

Fig. 9 Effect of rotation speed on average values of FPI and tunneling specific energy

(a)—驶向车站; (b)—驶离车站.

总体上,无论是驶向车站还是驶离车站的切桩过程中,FPI和掘进比能均随着推速的增加呈现增大趋势.在推速为0.30 mm/s时,FPI和掘进比能取得最小值,此时切削单位桩土体所需的推力最小,切桩效率较高.在驶向车站工况下,推速为0.30~0.40 mm/s时,切桩过程中掘进比能变化幅度较小;而在驶离车站的工况下,推速由0.30 mm/s逐渐增加时,场切深指数和掘进比能明显增高.原因在于驶离车站的工况下,桩体不再受到车站主体结构阻隔作用(图1所示),当推速超过一定值时,桩体在刀盘压力作用下向驶离车站的方向发生的变形增加,导致盾构机对桩体的推力下

降,切桩效率降低.综上,建议推速控制在0.30~0.40 mm/s.

综合FPI和掘进比能参数,在驶向车站方向切桩时的建议转速为0.130 rad/s.当转速为0.125 rad/s时,掘进比能均值最高,这主要是因为当刀盘转速较低时,需要较大扭矩克服桩体阻力.由图9b可见,当驶离车站方向切桩时,随着转速逐渐增加,FPI和掘进比能在0.135 rad/s附近出现最小值.综上,建议转速控制在0.130~0.140 rad/s.

2.2 基于钢筋切断效果的掘进参数优化

在盾构切桩过程中,钢筋的切断效果会对切桩效率造成直接影响.为避免钢筋缠绕刀盘和难以从螺旋输送机排出,从钢筋切断效果的角度,对盾构机的掘进参数进行分析.在模拟过程中,当刀具直接接触的钢筋应力达到损伤阈值时,相应的钢筋单元被删除,以模拟钢筋的切断效果.盾构机刀盘上贝壳刀的布置间距为350 mm,因此若切断钢筋的长度小于350 mm,可视为理想的切断效果.

本模拟针对不同工况下4号桩中的同一根钢筋进行分析.通过统计切断钢筋数量以及每一段钢筋的长度,研究盾构机的推速和转速对钢筋切断效果的影响.不同工况下同一根钢筋的切断长度统计结果如图10和图11所示.

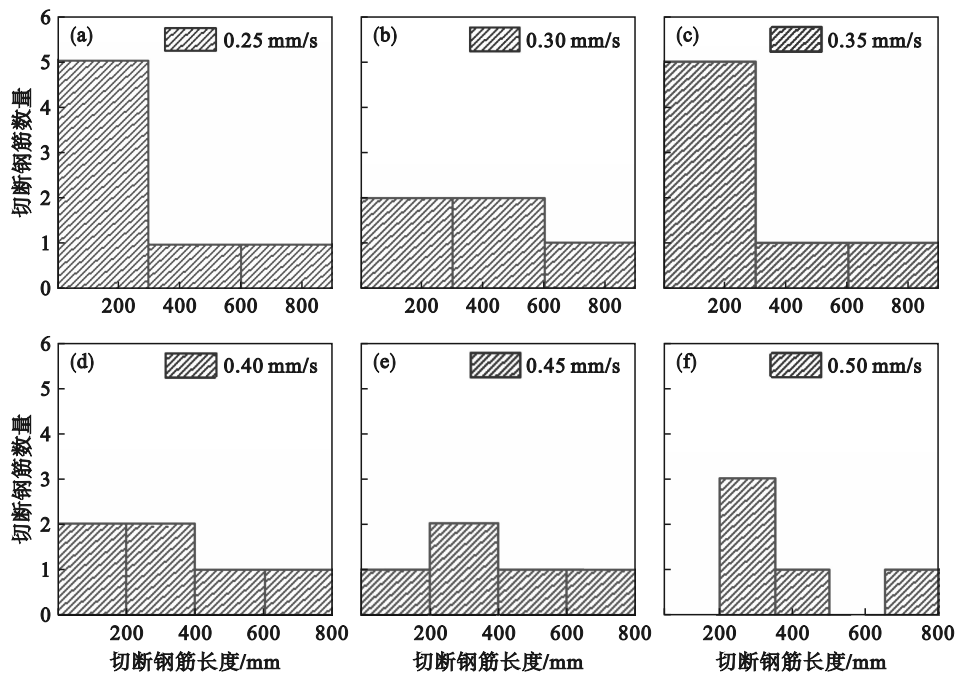


图10 不同推速下钢筋切断长度直方图

Fig. 10 Histogram of rebar cutting length under different advancing speeds

(a)—0.25 mm/s; (b)—0.30 mm/s; (c)—0.35 mm/s; (d)—0.40 mm/s; (e)—0.45 mm/s; (f)—0.50 mm/s.

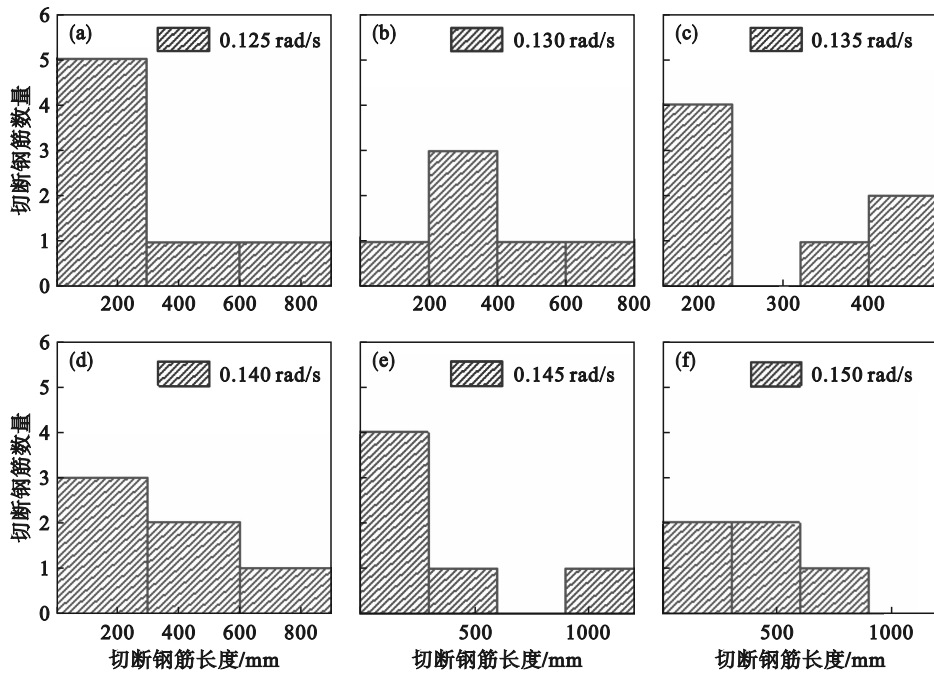


图 11 不同转速下钢筋切断长度直方图

Fig. 11 Histogram of rebar cutting length under different cutterhead rotation speeds

(a)—0.125 rad/s; (b)—0.130 rad/s; (c)—0.135 rad/s; (d)—0.140 rad/s; (e)—0.145 rad/s; (f)—0.150 rad/s.

从图10可以看出,当固定刀盘转速(0.125 rad/s)时,随着盾构机推速的逐渐增加,钢筋被切断的段数总体上逐渐减少,且长钢筋的数量逐渐增多.当推速小于0.35 mm/s时,切断长度小于350 mm的钢筋数量较多,说明低于这一推速,钢筋的切断效果较好.推速过高不利于盾构机刀盘刀具与钢筋充分接触,从而影响切断效果.从图11可以看出,在保持推速(0.25 mm/s)不变的条件下,当刀盘转速超过0.140 rad/s后,长钢筋的数量明显增多,推速过高使部分刀具还未接触到钢筋,钢筋就已经发生破坏,因此长钢筋数量较多.较长的钢筋容易缠绕刀盘,可能对盾构施工造成不利影响,因此建议刀盘转速不超过0.140 rad/s.

从图12a可以进一步看出,推速在0.30~0.40 mm/s范围内,钢筋断裂长度分布相对集中.其中推速在0.35 mm/s时,钢筋断裂长度均值最小,表明此推速下的钢筋切断以较短长度为主,更易被顺利排出,有利于提高施工效率.从图12b可以看出,盾构机转速在0.125~0.135 rad/s范围内时,钢筋断裂长度分布较为集中,钢筋断裂长度均值相对较小;此时钢筋受刀具充分切削产生剪切破坏,以小于刀间距的长度断裂,断裂效果更好且更容易被输送排出.当转速为0.145 rad/s时,切断钢筋的最大长度显著增加;这主要是因为较高的刀盘转速使钢筋在撕裂

刀的快速拉扯下产生破坏,导致钢筋容易以大于刀间距的长度被拉断.因此,综合考虑切断钢筋效果,推荐将刀盘转速设置为不超过0.135 rad/s.

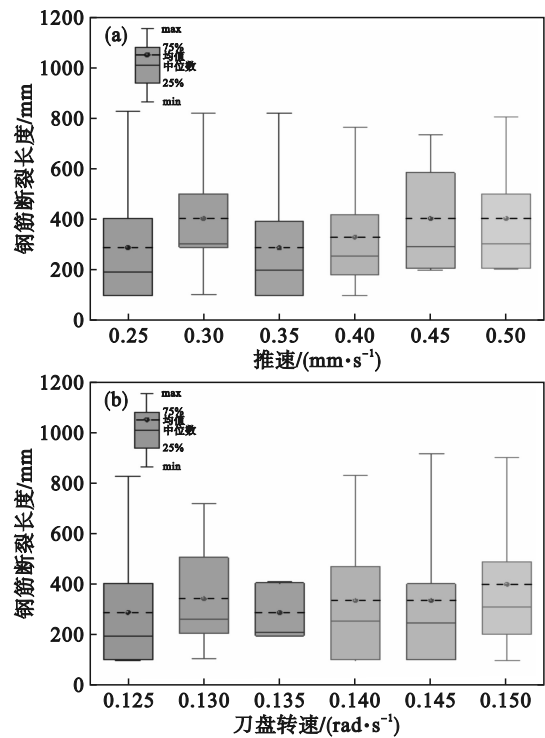


图 12 钢筋切断长度箱线图

Fig. 12 Box plot of rebar cutting length

(a)—不同推速下钢筋切断长度箱线图;

(b)—不同转速下钢筋切断长度箱线图.

2.3 基于应力扰动度的切桩参数优化

盾构机穿越既有群桩时,在切削桩体过程中不可避免会对周围保留桩体产生扰动,因此在选择盾构机掘进参数时,应考虑对保留桩体的影响.在盾构近接施工桩基扰动影响研究方面,扰动程度指标用于反映盾构近接施工时对桩体的影响.本文借鉴广泛使用的桩基应力扰动度(S)指标^[37],分析盾构切桩对周边保留桩体的影响. S 定义为桩基的平均应力扰动与桩身各点应力扰动的允许值之比,具体表达式如下:

$$S = \frac{\int_0^L S_1(z) dz}{L[S_1]} \quad (4)$$

$$S_1(z) = \left| \frac{\sigma'(z) - \sigma_0(z)}{\sigma_0(z)} \right| \quad (5)$$

其中: S 为桩基应力扰动度; $S_1(z)$ 为桩基轴线上距桩顶 z 处单元的应力扰动度; L 为桩长; $\sigma'(z)$ 为桩基轴线上距桩顶 z 处单元扰动后的应力; $\sigma_0(z)$ 为桩基轴线上距桩顶 z 处单元扰动前的应力; $[S_1]$ 为桩身各点应力扰动允许值,取值为0.262,当 S 超过0.8时,认为是强扰动^[38].

S 值越大,则盾构机在切桩过程中对既有留存桩体的影响越大.本文选取与盾构机直接切削的6根桩相邻的2根桩(1号和8号桩,见图1)为研究对象,分析其在切桩过程中的扰动情况,通常表现为桩基发生较大的变形或位移,导致桩基的承载力降低,甚至有失稳或破坏的风险.因此基于可接受的应力扰动度对掘进参数进行优化.

图13展示了在不同推速条件下,邻近桩基的应力扰动度变化规律.在驶向车站的工况下,由于车站主体结构对桩基侧向位移具有一定的限制作用.当刀盘转速保持不变时,随着推速的增大,切桩时对8号桩体的扰动程度总体也随之增大;土体变形引起的挤压作用使得邻近桩基的应力逐渐增大,在推速超过0.45 mm/s后应力扰动度显著增加.在驶离车站的工况下,此时桩体不再受到车站主体结构的阻挡作用,随推速的增加,邻近桩基受到的扰动程度总体显著增加,临近桩的应力扰动度波动较大.在推速超过0.40 mm/s后,8号桩的应力扰动度显著提高,这主要是因为8号桩相对于1号桩较短,盾构机切桩对其桩底的扰动程度更大.综上,为避免应力扰动度超过可接受的范围,建议推速不超过0.40~0.45 mm/s,避免对周围既有桩体造成过大的扰动.

图14展示了推速为0.25 mm/s时,随刀盘转速的增加,盾构切桩时对相邻既有桩体的应力扰

动度变化规律.总体来看,无论是驶向车站还是驶离车站方向切桩,当刀盘转速低于0.145 rad/s时,对周围桩体的应力扰动度均低于0.8.因此,建议刀盘转速不超过0.145 rad/s.

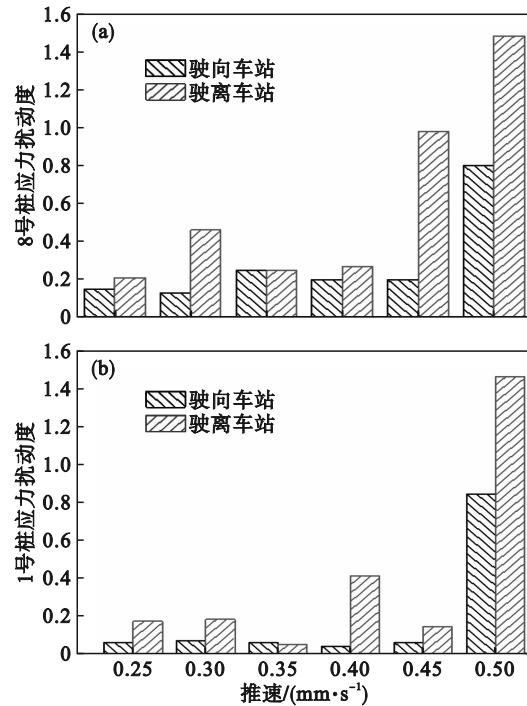


图13 推速对邻近桩基应力扰动度影响

Fig. 13 Effect of advancing speed on stress disturbance degree of adjacent pile foundations

(a)—8号桩应力扰动度; (b)—1号桩应力扰动度.

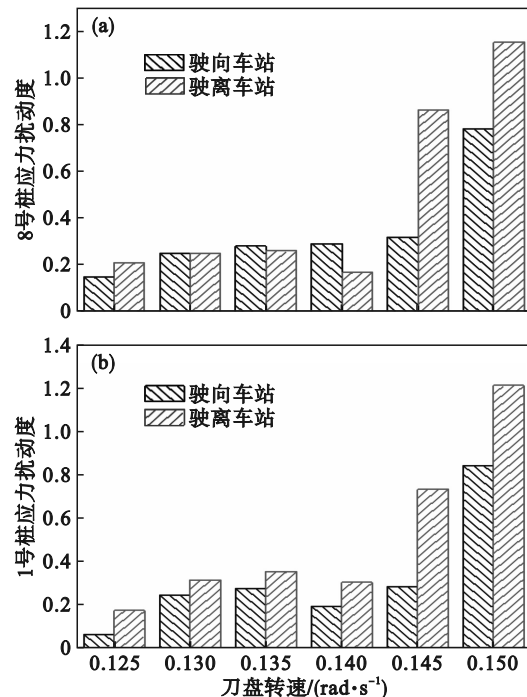


图14 转速对邻近桩基应力扰动度影响

Fig. 14 Effect of rotation speed on stress disturbance degree of adjacent pile foundations

(a)—8号桩应力扰动度; (b)—1号桩应力扰动度.

3 结 论

1) 切桩过程中,盾构机无论是驶向车站还是驶离车站,场切深指数 FPI 和掘进比能总体均随推速的增加而增加.本文模拟条件下,当推速为 0.30 mm/s 时,FPI 和掘进比取得最小值,建议控制推速不超过 0.4 mm/s.

2) 桩体钢筋被切断的长度随推速和转速的增加而增加.当推速小于 0.35 mm/s 时,切断长度小于 350 mm 的钢筋数量较多;在刀盘转速超过 0.140 rad/s 后,长钢筋的数量明显增多.因此,在本文模拟条件下建议转速不超过 0.140 rad/s.

3) 随着推速的增加,切桩时对周围桩体的扰动程度也随之增加,在推速超过 0.4 mm/s 后应力扰动度显著增加.

4) 最终建议推速不超过 0.4 mm/s,转速不超过 0.140 rad/s.

参考文献:

- [1] Masini L, Bergamo F, Rampello S. Effect of soil improvement on ground movements induced by conventional tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 155: 106163.
- [2] Jiang Y, Li Y L, Yao A J, et al. Soil deformation investigation of a piled-raft foundation pit under-crossed by a super-large diameter shield tunnel [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5774.
- [3] Huang K, Sun Y W, Yang J S, et al. Three-dimensional displacement characteristics of adjacent pile induced by shield tunneling under influence of multiple factors [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(5): 1597-1615.
- [4] Jeon Y J, Seo S K, Choi Y N, et al. Effects of pile tip cutting due to shield TBM tunnel construction on pile behaviour under various reinforcement conditions [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2024, 39(2): 181-195.
- [5] Wang F, Yuan D J, Cai R, et al. Field test study on cutting obstacle piles directly by shield cutters [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 353-356: 1433-1439.
- [6] Guan X M, Liu Z L, Xu H W, et al. Mechanical properties and influencing factors of shield cutting existing station supporting piles [J]. *Sustainability*, 2023, 15(15): 11699.
- [7] Ye X W, Liu Z X, Chen Y B, et al. Deformation of existing underpasses due to pile cutting and shield tunneling: observations from field monitoring and explanations by analytical model [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 21: e03836.
- [8] Lou P, Huang W X, Huang X D. Analysis of shield tunnels undercrossing an existing building and tunnel reinforcement measures [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5729.
- [9] 陈城, 史培新, 王占生, 等. 基于融合多注意力机制的深度学习盾构荷载预测方法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(11): 1631-1637, 1646. (Chen Cheng, Shi Pei-xin, Wang Zhan-sheng, et al. Shield load prediction method based on deep learning with multiattention mechanism [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(11): 1631-1637, 1646.)
- [10] Ma S J, Li M Y, Guo Y cheng, et al. Field test and research on shield cutting pile penetrating cement soil single pile composite foundation [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 23(6): 513-521.
- [11] Cao M M, Ma S J, Zhang J W. Numerical analysis study on the influence of shield cutting pile on the settlement of pile-soil composite foundation [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 2024(1): 5345820.
- [12] Guo Y D, Jin D L, Yuan D J, et al. Dynamic analysis of cutting RC structure with shield disc-cutter: insights from the coupled simulation and laboratory test verification [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 168: 109112.
- [13] Shi P X, Tao Y F, Jia P J, et al. Experimental study on shield machine cutting steel-reinforced concrete diaphragm wall [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 153: 106008.
- [14] Deng L C, Yuan Y X, Zhuang Q W, et al. Novel PDC cutter for reinforced concrete based on linear and rotational cutting tests [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 129: 104681.
- [15] Wang Y Q, Wang X Y, Xiong Y Y, et al. Full-scale laboratory test of cutting large-diameter piles directly by shield cutterhead [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 8780927.
- [16] Xu P, Zuo S X. Study on the JH-2 model parameters for metro shield cutting reinforced concrete pile [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(7): 5267-5278.
- [17] Chen X L, Zhang X M, Zhou X S, et al. Vertical mechanical response of axial loaded pile to tunneling-induced pile exposure [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 159: 105416.
- [18] Zhang Y T, Ding C, Lu H, et al. Effects of large-scale twin tunnel excavation on an existing pile group: three-dimensional centrifuge modeling [J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2022, 58(6): 500-506.
- [19] Jin D L, Guo Y D, Li X G, et al. Modeling of reinforced-concrete cutting with shield rippers using FEM-DEM-coupling method [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 282: 109619.
- [20] Yu H, Chen L, Peng K X. Adaptability of a reinforced concrete diaphragm wall cut by disc cutter [J]. *Sustainability*, 2022, 14(23): 16154.
- [21] Liu B, Li T, Han Y H, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 152: 105036.
- [22] Fang Y R, Li X G, Cui L M, et al. Dynamic damage and fracture mechanism of curved ripper cutting reinforced concrete composites: numerical simulation combined with engineering practice [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 149: 105786.
- [23] Deng L C, Yuan Y X, Li X Z, et al. Evaluation on cutting performance of novel PDC cutter for pipe jacking machine [J]. *Underground Space*, 2024, 14: 34-52.
- [24] Liu B, Hu M M, Zhang B, et al. Influence of abrasive waterjet pre-cutting slit on the performance of shield cutter cutting reinforced concrete [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 142: 105448.
- [25] 李发勇. 可拆解盾构下穿既有桥桩磨桩施工影响研究: 以宁波轨道交通 4 号线柳宁盾构区间为例 [J]. 隧道建设(中

- 英文), 2020, 40(10): 1506-1515.
(Li Fa-yong. Research on construction influence of dismantable shield crossing underneath existing bridge piles: a case study on Liuxi Station—Ningbo Railway Station section on Ningbo metro line No. 4 [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(10): 1506-1515.)
- [26] 王哲, 吴淑伟, 姚王晶, 等. 盾构穿越既有桥梁桩基磨桩技术的研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 117-125.
(Wang Zhe, Wu Shu-wei, Yao Wang-jing, et al. Study on grinding pile technology of shield crossing existing bridge pile foundation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(1): 117-125.)
- [27] Li X G, Yuan D J, Jiang X Q, et al. Damages and wear of tungsten carbide-tipped rippers of tunneling machines used to cutting large diameter reinforced concrete piles [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105533.
- [28] 殷雪峰. 盾构机切桩风险分析与施工技术探究[J]. 设备管理与维修, 2020(12): 146-147.
(Yin Xue-feng. Risk analysis and construction technology of shield machine pile cutting [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2020(12): 146-147.)
- [29] Xu Y F, Sun D A, Sun J, et al. Soil disturbance of Shanghai silty clay during EPB tunnelling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(5): 537-545.
- [30] 姜艳林. 广州地铁富水软弱地层盾构机直接切桩通过桥梁桩基风险分析与施工技术研究[J]. 广东土木与建筑, 2015, 22(5): 40-43.
(Jiang Yan-lin. Risk analyze and construction technology research on TBM directly cut and get through the bridge piers in rich water soft ground on Guangzhou metro [J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2015, 22(5): 40-43.)
- [31] Wang X Y, Yuan D J. Research on the interaction between the pile and shield machine in the process of cutting a reinforced concrete pile foundation [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(1): 245.
- [32] Wang G, Qiao S, Li G Y, et al. Direct shield cutting of large-diameter reinforced concrete group piles: case study on Shenyang Metro construction [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01864.
- [33] 杨辉, 万坤. 盾构下穿既有线路斜切群桩设计及应用[J]. 建筑机械, 2021(10): 90-92.
(Yang Hui, Wan Kun. Design and application of oblique cutting pile group of shield under existing line [J]. *Construction Machinery*, 2021(10): 90-92.)
- [34] 牛瑞, 王宁, 史策辉. 泥水盾构机切削大直径桥桩控制参数分析[J]. 工程技术研究, 2020, 5(8): 28-29.
(Niu Rui, Wang Ning, Shi Ce-hui. Analysis of control parameters of slurry shield machine cutting large diameter bridge piles [J]. *Engineering and Technological Research*, 2020, 5(8): 28-29.)
- [35] Li Z, Chen Z Q, Wang L, et al. Numerical simulation and analysis of the pile underpinning technology used in shield tunnel crossings on bridge pile foundations [J]. *Underground Space*, 2021, 6(4): 396-408.
- [36] 林向阳, 高伟琪, 刘学彦, 等. 盾构直接切削大直径桩施工技术研究[J]. 土木工程学报, 2024, 57(S1): 178-183.
(Lin Xiang-yang, Gao Wei-qi, Liu Xue-yan, et al. Research on the construction technology of directly cutting large diameter piles with shield tunneling [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2024, 57(S1): 178-183.)
- [37] 刘克奇, 杜佃春, 赵文, 等. 基于机器学习的泥水盾构关键掘进参数预测与优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(11): 1621-1630.
(Liu Ke-qi, Du Dian-chun, Zhao Wen, et al. Machine learning-based prediction and optimization of slurry shield's key tunneling parameters [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(11): 1621-1630.)
- [38] 王闯, 彭祖昭, 苟超, 等. 盾构近接下穿群桩基础施工影响分区研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(sup2): 174-181.
(Wang Chuang, Peng Zu-zhao, Gou Chao, et al. Study on the influence zone partition method of shield tunnel-pile foundations approaching construction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(sup2): 174-181.)